

液体の細管流動帯電

(流動電流とパイプ長さの関係について)

渡辺茂男*, 落合鎮康*, 大橋朝夫**, 伊藤正一*

Capillary Electrification of Liquids

(On the Relation Between Streaming Current and Pipe Length)

Shigeo WATANABE, Shizuyasu OCHIAI,
Asao OHASHI, Masakazu ITO

石油等絶縁性液体をパイプ輸送する際発生する静電荷は液体の抵抗率、流速およびパイプ長等に影響される。これまでの研究は液体輸送法としてポンプを用いたものが多い。ところがポンプ部分での静電気の発生が結果の解析を困難なものとしている。そこで今回筆者らは高圧ガスで液体を輸送し、パイプ長と帯電電荷量との関係を明らかにすべく実験を行ったので報告する。

1. まえがき

石油のような絶縁性の良い液体がパイプ等を通して輸送されると帯電することは良く知られている。このとき発生した電荷は液体と共に受器にもちこまれ、器物との間に火花を生じ、液体に引火して大きな事故を起こすことがしばしば報告されている。

事故を防ぐ一つの方法として、ASA-3等の帯電防止剤を混入し、発生した電荷を速やかに緩和する方法、電荷の発生場所、発生機構を調べ発生を少なくする方法の2種類の方法が考えられる。

流動によって発生する電流、すなわち流動電流については種々の報告があり、それぞれ流速、液体の抵抗率およびパイプ長等に関係¹⁾するものとされている。

これまで筆者らの実験によると液体の抵抗率と流動電流の間には密接な関係のあることが確かめられた²⁾が、細管(層流)の場合のパイプ長との関係は報告されていない。今回筆者らはこの点について実験を行い、従来の報告と異なる結果を得たので、一考察を加えた。

2. 予備的考察

2-1 流動電流

液体がパイプ内を流動すると帯電する現象は良く知られている。この現象は液体の純度および液体の流動等複雑な現象を伴うため帯電機構の解析は非常に困難である。

しかし固体と固体間のように二種類の物質が接触し、その接触面に正および負に帯電した粒子の分布を生じ、これらが流動によって反対符号の電荷の分離が行われると説明することもできよう。この電荷の分離はHelmholtz, Gouy, Chapman, 等の古典的な理論によるとパイプ壁と液体の接触面では液体中に存在するイオン、双極子等の一方の符号がパイプ壁に吸着し、それらの層から微小距離離れた場所に反対符号を持った電荷の層が存在し、いわゆる電気二重層を作る。このとき液体が流動すれば、液体側の層に存在するイオン等は液体と共に運びさらされ、いわゆる流動電流として観測される。このような場合、分離される電荷量はパイプ材質、液体の抵抗率、液体の流速、パイプ長および表面の状態等種々の要素によって決まるものと報告されている³⁾。

電気二重層については多数の研究者らによって種々の結果が報告されている。しかしこれらの研究結果はほとんど抵抗率の低い液体すなわち電解質の溶液についてであり、流体力学的にも液体の流れが層流の場合が多いようである。しかし静電気の影響を受ける部門は抵抗率の高い液体を扱い、液体の流れは乱流の場合が多いようである。

流動電流と液体の平均流速、パイプの径、液体の抵抗率との関係は電気二重層の厚さがパイプ径に比らべ薄いと仮定すると導びくことが出来る。この場合パイプ径方向の二重層の長さはパイプ円周に等しいので、流動電流

* 愛知工業大学電気工学科

** 名古屋大学工学部電気科

I は

$$I = \pi d_p \int \delta v dr \quad (1)$$

で表わすことができる。

ここで δ は電荷密度, d_p はパイプ径, v は液体の平均流速および r はパイプ壁からの距離である。

これを流体力学的な要因から考えるならば, 摩擦応力 f は

$$f = \frac{\eta \cdot dv}{dr} \quad (2)$$

で表わすことが出来る。

ここで η は粘性係数である。

ところが, パイプ壁に近い場所では液体の流れはほとんど層流と考えられるので摩擦応力は一定値をもつものと推定できる。その値を f_0 とすれば

$$f_0 = \frac{\eta v}{r} \quad (3)$$

となる。

これを静電界の問題として取り扱うならばポアソンの方程式,

$$\frac{-\delta}{\epsilon} = \frac{d^2 V}{dr^2} \quad (4)$$

が成り立つ。

ここで ϵ は誘電率, V は電位である。

(1)式は(3)式と(4)式から

$$I = -\frac{\pi d_p \epsilon f_0}{\eta} \int_0^{\frac{dv}{dr}=0} r \frac{d^2 V}{dr^2} dr \quad (5)$$

となり

(5)式を積分すると

$$I = -\frac{\pi d_p \epsilon f_0}{\eta} \left\{ \left[r \frac{dV}{dr} \right]_0^{\frac{dv}{dr}=0} - \int_0^{\frac{dv}{dr}=0} \frac{dV}{dr} \right\} \quad (6)$$

となる。ところが右辺の第1項は零となるので(6)式は

$$I = \frac{\pi d_p \epsilon f_0}{\eta} \int_0^{\frac{dv}{dr}=0} dV \quad (7)$$

となる。 $\int_0^{\frac{dv}{dr}=0} -dV$ は電気二重層の間の電位差でいわゆる ζ 電位と呼ばれている。これを ζ で表わせば

$$I = -\frac{\pi d_p \epsilon f_0 \zeta}{\eta} \quad (8)$$

となる。

2-2 パイプの長さとお流動電流

液体がパイプ内部を流動し, 発生する流動電流の最大値を示すにはある程度パイプ長が必要である。パイプ長と流動電流の関係は Bustin,⁴⁾ および Hampel & Luther⁵⁾ らによって報告されている。Hampel らによるとパイプ壁から液体中へ発生する電流密度 j_a と液体中からパイプ壁へもれる電流密度 j_w で示し, パイプの

軸方向, 短い部分 dx について発生する電流 dI は

$$dI = j_a \pi d_p dx - j_w \pi d_p dx \quad (9)$$

となる。

もれ電流密度 j_w は電界の強さ E , および電束密度 D とすれば

$$j_w = KE = K \frac{D}{\epsilon} \quad (10)$$

で示すことができる。

ここで K は液体の導電率である。

パイプの短い部分 dx に含まれている電荷を dQ とすれば電束密度 D は $D = dQ / \pi d_p dx$ で表わすことが出来るから(10)式は

$$j_w = \frac{K}{\epsilon} \frac{dQ}{\pi d_p dx} \quad (11)$$

となる。

一方流動電流 I は

$$I = Sv\delta \quad (12)$$

で示される。

ここで S はパイプ断面積である。

パイプの短い部分 dx について(12)式は

$$I = Sv \frac{dQ}{\pi d_p dx} = v \frac{dQ}{dx} \quad (13)$$

となる。

(9)式に(11)式および(13)式を代入すると

$$dI = \left(j_a \pi d_p - \frac{I}{v\tau} \right) dx \quad (14)$$

となる。

ここで τ は放電の時定数 ϵ / K である。

パイプ長が零の場合, 発生する流動電流は零と考えられるので, この境界条件を入れ(14)式を解くと

$$I = \pi d_p v \tau j_a \{ 1 - \exp(-\frac{x}{v\tau}) \} \quad (15)$$

が得られる。

(15)式は流動電流が指数関数的に増すことを示し, 最大値に近づくパイプ長は平均流速 v と放電の時定数 τ の積 $v\tau$ によって決まることがわかる。

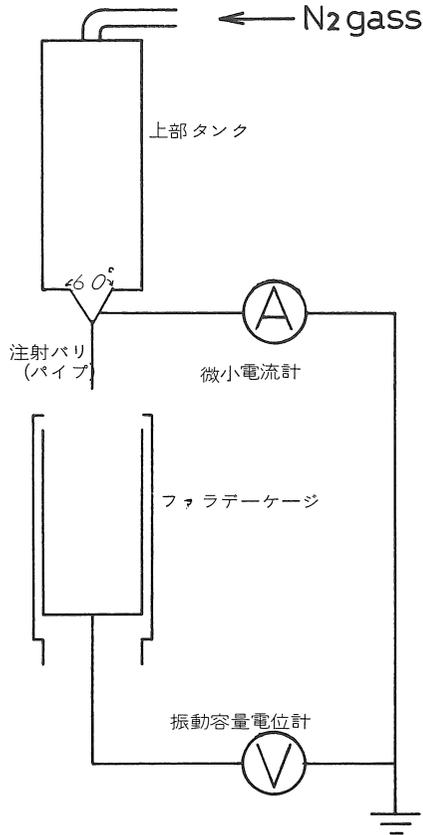
3. 実験装置

実験装置は一定量液体を貯える上部タンク, 主に流動電流を発生させるパイプ, 電荷量を測定するファラデーージから成り立っている。

実験装置の概略を第1図に示す。

3-1 上部タンク

上部タンクは直径1インチの銅パイプ製で下部は液体の流れを滑らかにするため, 拡大角60°に加工されている。



第1図 実験装置の概略

3-2 パイプ

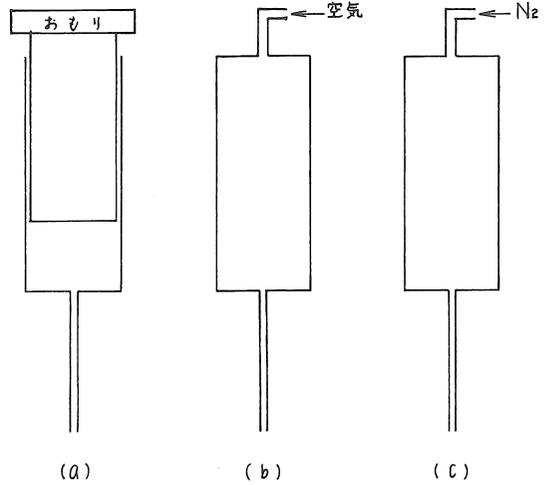
使用したパイプは㈱トップ製のステンレス注射針で内径0.2mmφ、外径0.4mmφ、長さ1.0cm、2.0cm、4.0cm、5.0cm、6.0cm、7.0cm、10.0cm および 20.0cm の計8種であり、針の先端は直角に切断されている。パイプ内部の洗浄は、ベンジン→アルコール→蒸留水→10%塩酸→蒸留水→アルコール→熱風乾燥の手順で行い、常にパイプ内面に付着物のないように注意した。

3-3 測定器

パイプ電流の測定には、タケダ理研製微小電流計TR-8641、川口電機製振動容量微小電位計MMA II-17を、ファラデーケージとしてタケダ理研製TR-8031、抵抗率測定にはタケダ理研製液体抵抗測定用試料容器TR-44、直流電源として川口電機製高精度直流電源Model V-703を用いた。

3-4 試料

実験に用いた液体は市販の灯油およびプロピルアルコールで、抵抗率は $7.85 \times 10^8 \Omega\text{m}$ および $7.96 \times 10^4 \Omega\text{m}$ 、比誘電率は2.1および20.1であった。



第2図 実験装置の説明

3-5 圧力調整器

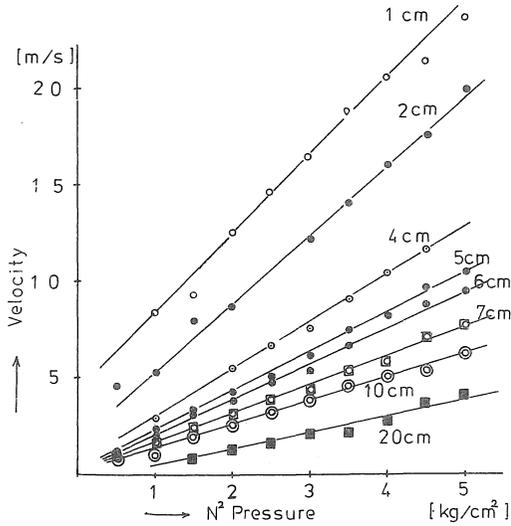
液体の流速を変える方法として第2図(a)(b)(c)の3種類が考えられる。このうち(a)では内筒と外筒の間で摩擦を生じ、この部分での電荷発生量が、パイプ部分での電荷発生量に比し無視できなかったため、今回の実験目的には不適當であった。(b)では空気圧を利用してはいるため、空気中の水分、ほこり等の影響および圧力の制御に問題点がある。(c)では高圧窒素ガスを利用してはいるので、静電気実験には最も適し、実験結果の再現性が非常に良い。今回の実験には(c)を用いた。圧力調整器として㈱小野製作所製造、二段圧力調整器WR-11-NPを用いた。この圧力調整器は一段側減圧部でポンベの圧力が減圧され、一段側の二次圧力はポンベの圧力低下による影響はなくほぼ一定の圧力を示すこととなる。このため二段側減圧部では二段側の一次圧力変動による二段側二次圧力の変動はほとんど起こらない構造になっている。

4. 実験方法

次の順序で二種類の実験を行った。まず流速測定実験を行い次に流動電流測定の実験を行った。

4-1 流速測定実験

この実験は上部タンクに約20ccの液体を入れ下部にメスシリンダーを置く。その後窒素ポンベを開き、一定圧力を加える。このとき流下する時間をストップウォッチで計り、パイプ断面積および液体の量からパイプ内部の平均速度を求めた。この操作を各圧力、各パイプ長および各液体について測定した。その結果の一例を第3図に示す。



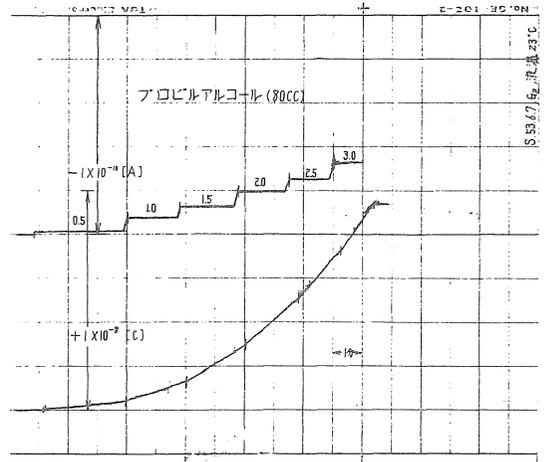
第3図 窒素ガス圧力と流速の関係

4-2 流動電流測定実験

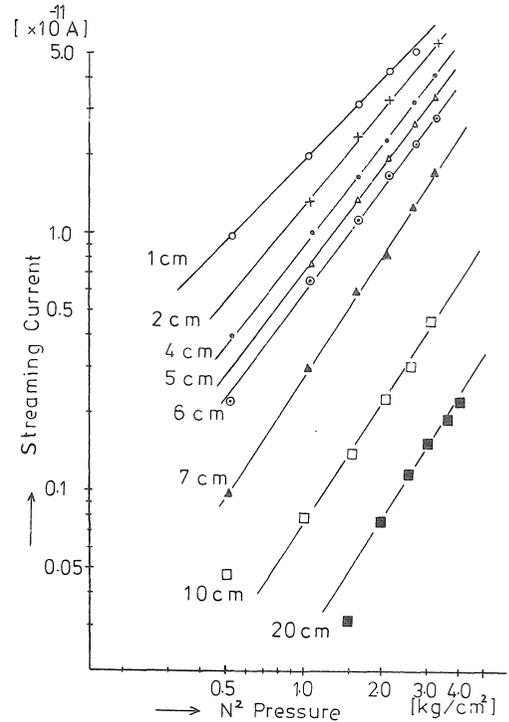
この実験では上部タンクに約80ccの液体を入れ、約30分間静置した。これは上部タンクに液体を注入する際に発生した電荷を大地へ逃がすためと、タンク内部での液体の流動を静止させるためのものである。その後上部タンクに微小電流計を下部タンクにはファラデー計と振動容量電位計を接続する。先ず窒素ガスの圧力を0.5kg/cm²と設定し、パイプの電流（以後流動電流と呼ぶ）が一定値を示すまで実験を行い、その後順次1.0kg/cm²、1.5kg/cm²と連続して加圧し、3~4kg/cm²まで実験を行った。流動電流およびファラデー計の電荷量は計器に接続された記録計の指示値から読み取った。この操作を各液体、各パイプ長について行った。第4図はパイプ長5cmで行ったプロピルアルコールの実験結果である。図中横軸は時間（1目盛1分）、縦軸は流動電流及び電荷量を表わす。流動電流は窒素ガスの圧力が上昇するにつれ階段状になり電荷量は傾きの異なることが認められる。

一方、窒素ガス圧と流動電流の関係を各パイプ長について測定した結果の一例（プロピルアルコール）を第5図に示す。図から流動電流（I）と窒素ガスの圧力（P）との間に $I \propto P^{1.1-1.5}$ の関係にあることが認められる。

第4図、および第5図から、パイプ中の液体流速が4m/sのとき発生する流動電流の値とパイプ長との関係を求めると第6図になる。（灯油についても同様な方法で行う）このとき求められる流動電流の値は液体の抵抗率の違いに関係なく、いずれもパイプ長が5cm付近で最大値を示すことは図から読みとることができる。



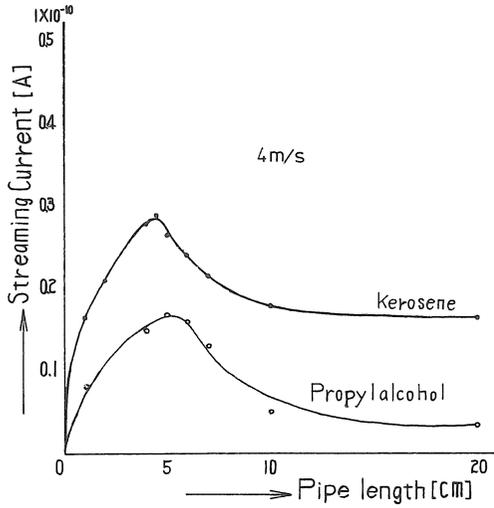
第4図 実験結果の一例



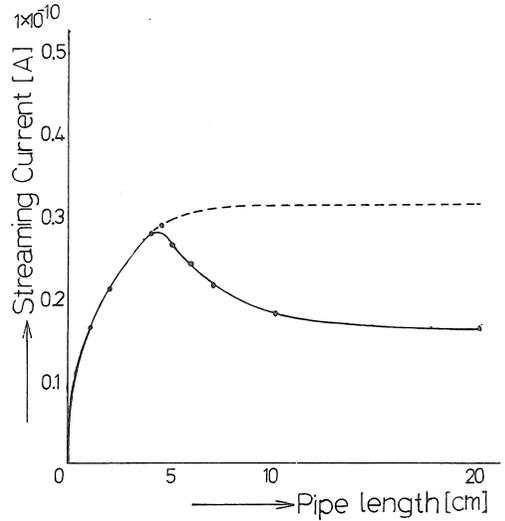
第5図 窒素ガス圧力と流動電流の関係

5. 考察

これまで流動電流とパイプ長についてはSchön, Hampel & LutherおよびBustinらが行った実験を行い、関係式を求めている。これらによると流動電流は指数関数的に最大値に近づくことになる。ところが筆者らの結果はこれらの報告と異なる。その原因として現在まで行われた実験は筆者らの実験と比較して、パイプの径が太いことがわかった。これまで流動電流の発生は電気二重層に



第 6 図 パイプ長さと流動電流の関係



第 7 図

よるものと考えられ、電気二重層はパイプ径に比べ薄いと仮定されている。この点も大きな違いとしてあげられる。(K linkenberg によるとガソリンを用いた場合、電気二重層の厚さは 0.2mm と報告している。この値が正しいとすればパイプ径と同じ値となる) またもう 1 つの考え方は、液体はパイプに流入する場合、入口から直ちに層流 (又は乱流) の速度分布になるのではなくある長さを流れた後に定まった速度分布になっていく。このパイプ長が助走距離といわれるもので、助走距離内部は液体の流れが他の部分とは異なるため、多くの流動電流を発生するとも考えられる。

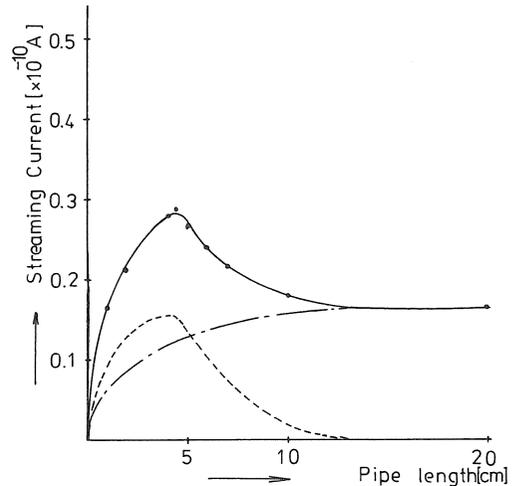
筆者らは流動電流のパイプ長に対する依存性を説明するために、次の 2 つの可能性について検討した。

(I) Hampel & Luther らの結果と同様、流動電流は指数関数的に増す。ある値以上になるとファラデージから上部タンクへ、液体を通して逆電流が流れ、その影響のためパイプ長が増すと観測される流動電流は減少する。このように考えると結果は第 7 図の実線 (測定値) と破線 (Hampel らの理論に従うと考えられる部分) になる。

(II) 指数関数的に増す値は (I) で考えた程大きくなく、パイプ長の短い部分で発生する電流の方が多く考えると実験結果は第 8 図の二つの項に分類できる。破線のは液体が層流に落ちつくまでに発生すると想像される電流、一点鎖線はこれまでの理論 (K linkenberg ら) に従うと想像される電流である。

5-1 (I) の実験について

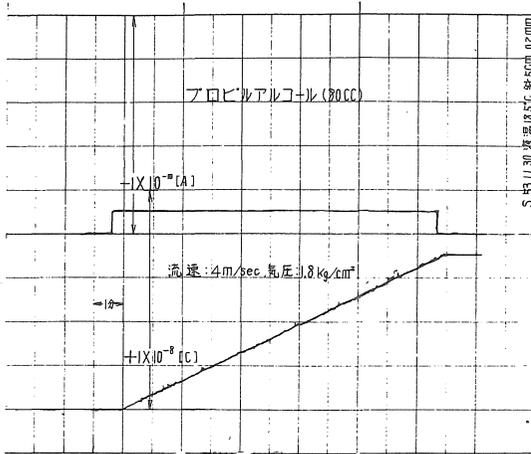
実験結果第 4 図から、ファラデージで測定される電



第 8 図

荷量は約 $9.4 \times 10^9 [c]$ である。ところがファラデージの静電容量はほぼ 20 pF 程度であるからファラデージは約 470 V 程度の電位になる。このため上部タンクからファラデージへ流れている液体を通して逆電流の流れることは充分考えられる。プロピルの場合には $7.96 \times 10^4 \Omega m$ であるから上部タンクから下部まで約 10cm とすると流れている液体の面積をパイプ断面積と同じと仮定すれば上部タンクと下部タンクの抵抗は $2.5 \times 10^{11} \Omega$ となり、この間では $1.9 \times 10^{-9} (A)$ 程度の電流が流れることになる。この値はプロピルアルコールのパイプ長 20 cm で測定される流動電流の値より大きい。

逆電流の影響を調べるために、パイプ長 5 cm でプロピルアルコールの流速 4 m/s の実験を行った。その結果



第9図 実験結果の一例

を第9図に示す。この結果ではファラデーに蓄積される電荷量は増し、電位も上昇しているが、電荷量の飽和現象は見られないので、ファラデーから上部タンクへ逆流する電流の影響はないものと考えられる。従ってこの説は正しいとは思われない。

5-2 (II) の実験について

実験結果を助走距離の部分で発生する流動電流と H-ampel らの理論と一致する部分に分離する。この場合電流の最大値は液体の平均流速と緩和時間との積によって決まることが知られている。また電荷量は流速に比例すること⁶⁾および液体の流れが乱流では層流に比らべ流動電流の発生量の多いこと⁷⁾等を考慮すれば助走距離部分で発生する電流の多いことは理解出来る。これらの事から助走距離および緩和長との検討を行う。

5-2-1 緩和長さについて

①緩和長 τ は流速 4 m/s の場合プロピルアルコールでは 5.6×10^{-5} m となり結果と一致しない。灯油の場合は 0.06 m となり流動電流の最大値を示すパイプ長とほぼ一致する。

5-2-2 流れの状態について

①助走距離については液体の流れが層流の場合は Bousinesse の理論式 $L_0 = 0.13 r R_0$ ⁸⁾ とよく一致することが知られている。ここで R_0 はレイノルズ数である。この場合プロピルアルコールは 4.6×10^{-3} m, 灯油は 7.1×10^{-3} m となりいずれも実験結果と一致しない。乱流に対しては種々の実験式が求められているが、Nikuradse の式 $L_0 = (50 \sim 80) r$ ⁹⁾ を用いると、プロピル、灯油とも $5 \sim 8 \times 10^{-3}$ m となり一致しない。

前述したように細管流動帯電ではこれまでの理論、実験で説明出来ない部分が多く見られ、今回の結果も同様である。より一層実験を進め明らかにしたい。

最後に本実験を進めるにあたり大変有益な御助言を頂いた名古屋大学工学部電気学科、上田実教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1), 7) A. Klinkenberg and J. L. van der Minne : Electrostatics in the Petroleum Industry Elsevier 1958
- 2) 渡辺, 大橋, 伊藤, 上田
昭和53年電気関係学会東海支部連合大会
- 3), 8), 9) 高分子学会: 静電気ハンドブック昭42
- 4) W. M. Bustin: 37th Annual Meeting of the American Petroleum Industry in Chicago 1957
- 5) B. H. ampel & H. Luther: Chemie—Ing—Techn. 29. Jahrg 1957/Nr. 5
- 6) 渡辺, 伊藤, 上田
第2回静電気学会全国大会 p 38~ 昭53